



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 42 31 935 C 1

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 B 11/26
G 01 C 21/18

②1 Aktenzeichen: P 42 31 935.8-52
②2 Anmeldetag: 24. 9. 92
④3 Offenlegungstag: —
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 7. 4. 94

DE 42 31 935 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
eV, 53127 Bonn, DE
⑦4 Vertreter:
Grafs, H., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 38102 Braunschweig

⑦2 Erfinder:
Rodloff, Rüdiger, Dr., 3176 Meinersen, DE; Stieler,
Bernhard, Dr., 3300 Braunschweig, DE; Lübeck,
Egmar, Dipl.-Ing., 3300 Braunschweig, DE; Wetzig,
Volker, Dipl.-Phys., 3300 Braunschweig, DE; Probst,
Reinhard, Dr.-Ing., 3300 Braunschweig, DE

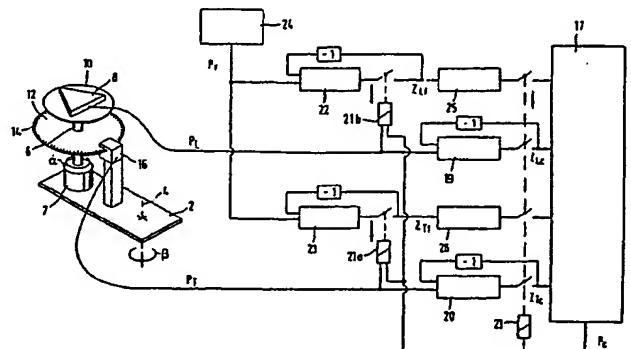
⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 38 20 906 A1
WO 88 06 712

Kontakt und Studium, Bd. 260, Industrielle Win-
kelmeßtechnik, S. 118-121, Expert Verlag;
DLR Forschungsbericht 89-50. Winkelmessung mit
dem Laserkreisel GG 1342;
Dr. rer. nat. Rodloff, R.: Wo liegen die Grenzen des
Laserkreisels. In: DLR-Nachrichten, H. 61,
November 1990, S. 12-15;

⑤4 Kreiselsystem zur Winkelmessung

⑤7 Kreiselsystem zur Winkelmessung und/oder Navigation
mit einem in einem Gehäuse um eine gehäusefeste Achse
drehbar gelagerten und mit konstanter Geschwindigkeit
angetriebenen Kreisel. Auf der Drehachse des Kreisels ist
zusätzlich ein Teilkreis zur Messung der Drehung gegenüber
dem Gehäuse angeordnet, der mit einem mit dem Gehäuse
fest verbundenen Ausleselement zusammenwirkt. Die Aus-
lese von Kreisel und Teilkreis erfolgt in Form von Pulsketten.
Aus diesen Pulsketten und den Pulsen einer höherfrequenten
Zeitbasis wird in einem Rechner der Pulsversatz zwischen
den Pulsen interpoliert.



DE 42 31 935 C 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Kreiselssystem zur Winkelmessung und /-navigation nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Bei einem bekannten Kreiselssystem dieser Art mit einem Laserkreisel wird durch eine konstante Drehrate der Laserkreisel oberhalb der Lock-in-Schwelle innerhalb eines Gehäuses betrieben — Rate-Bias-Kreisel. Um eine Information über den Drehwinkel des Kreisels gegenüber dem Gehäuse zu erhalten, durchläuft das System jeweils nach einer vollen Umdrehung eine Lichtschranke, die es gestattet, den 360° -Winkel mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von etwa einer Winkelsekunde ($1''$) zu bestimmen. Mit einem 360° -Puls wird ein Zähler gesteuert, der die Ausgangspulse (Interferenzstreifen) zählt. Wird das Gehäuse erdfest gehalten, so erhält man nach Abzug der von der Erddrehung herrührenden Anteile die Anzahl der Kreiselimpulse pro 360° bzw. den Drehwinkel pro Laserkreiselausgangsimpuls, also den Skalenfaktor (DLR-Nachrichten 61, November 1990, Seiten 12—15).

Kreisel haben den Vorteil, daß mit ihnen Winkelmessungen ohne ortsfeste Basis möglich sind. Konventionelle Laserkreisel sind hinsichtlich ihrer Winkelauflösung begrenzt. Sie liegt zwischen $1,5-3''$. Auch durch Erweiterung der konventionellen Signalauslesung läßt sich dieser Wert allenfalls um den Faktor 2 oder 4 verbessern. Für viele Anwendungsfälle werden jedoch Auflösungen gefordert, die um 1—2 Größenordnungen größer sind.

Für Präzisions-Winkelmessungen sind Winkelabgriffe für die Bewegung von Roboterarmen (DE 38 20 906 A1) und Drehtische mit eingebautem digitalen Meßsystem bekannt. Diese enthalten einen Teilkreis mit einer Winkelteilung in Form eines Strichgitters, das fotoelektrisch abgetastet wird. Bei kommerziellen Meßsystemen sind Teilungen bis 36 000 Strichen auf dem Kreisumfang realisiert entsprechend einem Winkelmeßschritt von $0,01^\circ = 36''$. In Verbindung mit einer 1024fachen digitalen Interpolation des Teilungsintervalls werden Meßschritte bis herab zu $0,035''$ erreicht.

Die Meßunsicherheit ist hierbei bedingt durch Teilungsabweichungen bei der Herstellung des Teilkreises, durch Justierfehler bei Einbau des Teilkreises in den Winkelmeßtisch und durch Interpolationsfehler bei der Signalverarbeitung.

Die Meßunsicherheit läßt sich verringern mit Hilfe eines selbstkalibrierenden dynamischen Winkelmeßverfahrens, bei dem durch permanente Drehung des Teilkreises der Vollwinkel von 360° als fehlerfreies Normal herangezogen wird. Bei diesem Meßverfahren liefert die Teilkreisauslesung ein periodisches Signal, dessen Phasenlage durch Vergleich mit einem phasenkonstanten Referenzsignal als Winkelmaß ausgewertet wird. Durch Integration (Mittelwertbildung) über den Vollkreis wird dabei das Prinzip benutzt, daß die Summe aller Teilwinkel 360° beträgt und die Summe aller Teilungsabweichungen grundsätzlich 0° ist. Es ist dabei weiter bekannt, zwei Teilkreisscheiben mit gleichen Strichgittereinteilungen auf einer Achse zu befestigen und diese permanent von einem Motor anzutreiben. Das Aufnehmersystem des unteren Teilkreises ist dabei fest an der den Drehantrieb tragenden Grundplatte montiert und erzeugt ein phasenkonstantes Referenzsignal. Das Aufnehmersystem des oberen Teilkreises ist an einem darüber gelagerten Drehtisch befestigt und liefert ein phasenveränderliches Meßsignal (Kontakt und Studium, Band 260, "Industrielle Winkelmeßtechnik", Expert Verlag, S. 118—121). Mit einem derartigen System mit zwei Teilscheiben läßt sich die Meßsicherheit auf $0,03''$ reduzieren. Zur Phasenauslegung wird hierbei ein 64-MHz-Oszillator verwendet, der eine Winkelauflösung von $0,04''$ für die Einzelmessung ermöglicht. Die Auflösung des Gesamtsystems liegt bei $0,01''$.

Es ist weiter ein inkrementales Längenmeßsystem bekannt, das zur genauen Positionsbestimmung zwischen zwei inkrementalen Schritten mit einem Interferometer zusammenwirkt (WO 88/06712).

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Kreiselssystem der gattungsgemäßen Art so weiter zu entwickeln, daß eine Auflösung in der gleichen Größenordnung erreicht wird. Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung gelöst durch die im kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1 herausgestellten Merkmale. Zweckmäßige Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

Da die Winkelmessung mit dem erfindungsgemäß ausgebildeten Kreiselssystem für die Winkelbestimmung keine ortsfeste Basis benötigt, lassen sich mit ihm Winkelmessungen dort durchführen, wo andere Verfahren versagen. Als Beispiel seien hier die Robotik- oder die modernen Großteleskope in Leichtbauweise genannt. Bei Robotern interessiert in der Regel die Lage des Greifers. Eine Bestimmung der Greiferposition mit Hilfe von Winkelmessern in den Gelenken der Roboterarme ist vielfach nicht möglich, da sich die Arme lastabhängig verbiegen. Bei den modernen Leichtbauteleskopen entfällt wegen des Wegfalls schwerer Tragwerkkonstruktionen die Möglichkeit, die Winkel an den Achsen der Drehgestelle auszulesen. In solchen Fällen können Winkellagen und Winkeländerungen mit dem erfindungsgemäßen Kreiselssystem mit großer Präzision bestimmt werden.

Mit der Steigerung der Winkelauflösung und der Bandbreite der Messung wird ein Kreiselssystem auch für andere Anwendungsfälle geschaffen, in denen eine hohe Winkelauflösung und Bandbreite der Messung gefordert ist. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß eine Kalibrierung über den 360° -Vollkreis im stationären Zustand möglich wird.

Die Erfindung ist in der Zeichnung in einem Ausführungsbeispiel veranschaulicht und im nachstehenden im einzelnen anhand der Zeichnung beschrieben.

Fig. 1 zeigt schematisch eine Ausführungsform eines Kreiselsystems gemäß der Erfindung.

Fig. 2 zeigt ein Kreiselssystem nach Fig. 1 mit einer Ausführungsform einer Schaltung für die Auslesung des Kreisels.

Fig. 3 zeigt die Auslesung anhand von Diagrammen.

Fig. 4 zeigt das Kreiselssystem nach Fig. 1 mit einer zweiten Ausführungsform einer Auslesungsschaltung.

Fig. 5 zeigt in isometrischer Darstellung eine abgewandelte Ausführungsform eines Kreiselsystems zur Durchführung räumlicher Winkelmessungen.

Fig. 6 zeigt eine Weiterbildung des Kreiselsystems nach Fig. 5.

Das in Fig. 1 dargestellte Kreissystem ist in einem Gehäuse angeordnet, das hier durch eine Grundplatte 2 repräsentiert ist. Die Grundplatte 2 ist um eine Achse 4 schwenk- oder drehbar. Der Winkel β ist der zu bestimmende Drehwinkel im Inertialraum.

Auf der Grundplatte 2 ist eine relativ zur Platte 2 drehbare Achse 6 angeordnet, die von einem Motor 7 mit einer konstanten Drehzahl permanent gedreht wird. Auf der Achse 6 ist drehfest ein Kreisel 8, vorzugsweise ein Laserkreisel, befestigt, der beispielsweise auf einer Scheibe 10 angeordnet sein kann. Kreisel sind unempfindlich gegen eine dezentrale Aufhängung. Es ist also keine Feinjustierung des Kreisels 8 auf der diesen tragenden Scheibe 10 erforderlich.

Auf der Achse 6 ist weiter drehfest eine Scheibe 12 angeordnet, die einen Teilkreis 14 mit inkrementaler Winkelteilung in Form eines Strichgitters trägt. Die Teilung kann dabei beispielsweise 36 000 Striche auf dem Kreisumfang betragen, wie sie bei Teilkreisen für Winkelmessungen vielfach verwendet werden.

Für den Teilkreis 14 ist ein Ausleseelement 16 vorgesehen, das fest mit der Platte 2 verbunden ist und ein Ausgangssignal P_T liefert. Auch für den Laserkreisel 8 ist ein übliches Auslesesystem vorgesehen, das hier nicht im einzelnen dargestellt ist und ein Ausgangssignal P_L liefert. Die Signale P_T und P_L sind Pulsketten. Diese Signale werden einer in Fig. 1 als Block dargestellten Schaltung zur Winkelbestimmung aufgegeben. In der Schaltung sind zur Winkelgrobbestimmung Mittel zum Zählen der Pulse jeder der beiden Pulsketten P_T und P_L vorgesehen. Zur Winkelfeinbestimmung enthält die Schaltung Mittel zur Interpolation des Pulsversatzes zwischen den Pulsen der beiden Pulsketten unter Verwendung von Pulsen einer höherfrequenten Zeitbasis.

Die Signalfrequenz des Laserkreisels beträgt:

$$\nu = (4 F/L\lambda) \cdot \Omega \quad (1)$$

F: Vom Laserresonator eingeschlossene Fläche;

L: Umfang des Resonators;

λ : Lichtwellenlänge;

Ω : Drehrate (Drehwinkel pro Sekunde) gegenüber dem Inertialraum.

Der Drehwinkel γ ergibt sich nach $\gamma = \int \Omega dt$ durch Zählung der Interferenzstreifen am Ausgang des Ringlasers. Für die Anzahl n der am Detektor vorbeilaufenden Interferenzstreifen gilt:

$$n = (4 F/L\lambda) \gamma = K\gamma \quad (2)$$

Der Skalenfaktor K ist gleich der Anzahl der Interferenzstreifen dividiert durch den zugehörigen Winkel, in Analogie zum Teilkreis also gleich der Anzahl der Teilungsschritte pro 360° . Der reziproke Wert $1/K$ kann damit als Teilungsintervall $\Delta\Phi_L$ des Laserkreisels aufgefaßt werden. Denkt man sich die vom Laserresonator eingeschlossene Fläche F durch eine gleich große Kreisfläche mit dem Radius R ($F = \pi R^2$) und den Umfang L des Resonators durch den entsprechenden Kreisumfang ($L = 2\pi R$) ersetzt, so läßt sich die obige Gleichung umschreiben in:

$$n = (2 R/\lambda) \cdot \gamma \quad (3)$$

Für eine volle Umdrehung, d. h. $\gamma = 2\pi$ ergibt sich für die Anzahl der Interferenzstreifen:

$$N = (4 \pi R/\lambda) = 2 L/\lambda \quad (4)$$

bzw.:

$$N = 2m, \quad (5)$$

wobei $m = L/\lambda$ die Anzahl der Wellenlängen ist, die in einen Ringresonator der Länge L passen (m : Ordnungszahl des Resonators; typisch: $m = 10^6$). Der Faktor "2" in der letzten Gleichung gilt nur für einen kreisförmigen Resonator; für einen viereckigen Resonator ist der Faktor 1,51 und für einen dreieckigen 1,31. Den Laserkreisel 16 kann man demnach als einen Teilkreis mit dem Teilungsintervall $\lambda/2R$ auffassen.

Im Unterschied zu dem mechanischen Teilkreismeßsystem mit Winkelmessung des auf der Scheibe 12 angebrachten Teilkreises 14 gegenüber dem Aufnehmersystem 16 geschieht beim Laserkreisel 8 die Winkelmessung gegenüber dem absolut ruhenden Bezugssystem. Somit wird von ihm der Winkel γ gegenüber dem Inertialraum aufgenommen, während das Aufnehmersystem 16 des unteren Teilkreises 12, 14 nur den Drehwinkel α des Motors relativ zum Gehäuse registriert. Die Differenz der Winkelmeßsignale P_L und P_T ergibt daher den gesuchten inertialen Drehwinkel β des Gehäuses 2.

$$\beta = \gamma - \alpha \quad (6)$$

In Fig. 2 ist eine Ausführungsform der Schaltung zur Signalverarbeitung mittels eines rechnergesteuerten Zeittaktes wiedergegeben.

Der Laserkreisel 8 liefert nach Messung eines Winkelinkrements $\Delta\Phi_L$ einen Puls P_L und das Aufnahmesystem 16 des Teilkreises 14 einen Puls P_T beim Durchlauf einer Teilkreis-Strichmarke. Beide Pulsketten P_L und P_T werden in Rücksetz-Zählern 19- Z_{Lc} und 20- Z_{Tc} aufsummiert. Ein Rechner 17 liest den Zählerstand z_{Lc} und z_{Tc} mit einer festen Taktfrequenz aus und setzt die Zähler auf Null zurück, was in Fig. 2 durch den Puls P_c , der ein Schaltrelais 21 speist, symbolisiert ist. Der Index c = coarse beider Zähler 19, 20 und ihrer Zählerstände z_{Lc} und

z_{Tc} deutet darauf hin, daß in ihnen nur die Grobinformationen über die Winkel γ und α gespeichert sind. Die Feininformationen (Index f = fine) werden von Zählern 22- Z_L und 23- Z_T geliefert, die die Pulse P_L einer Zeitdifferenz 24 aufsummieren. Die Auslesung und Rücksetzung ihrer Zählerstände Z_L und Z_T wird sowohl von den Pulsen P_L und P_T gesteuert als auch alternativ von dem Rechnerpuls P_c . Beide Zählerstände z_L und z_T gehen in jeweils einen Speicher 25- S_L und 26- S_T zur Zwischenspeicherung des letzten Zählerstandes z_{L1} und z_{T1} und des aktuellen Zählerstandes z_{L2} und z_{T2} . Der Auslesepuls P_c des Rechners 17 veranlaßt die Übernahme dieser Informationen in den Rechner 17.

Die Signalverarbeitung für eine Winkelmessung zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 wird nun mit Hilfe von Fig. 3 erläutert. Hier ist in der linken Hälfte das Zeitdiagramm für das Laserkreisel-Meßsignal und in der rechten Hälfte das des Teilkreises 4 mit Aufnehmersystem 10 skizziert. Beide sind im Prinzip identisch, und die Diskussion beschränkt sich auf die linke Hälfte.

Das obere Diagramm zeigt den angenommenen Verlauf der vom Laserkreisel gemessenen Eingangs-drehrate $\dot{\gamma}$, die in der Regel vor der des Motors 8 und Teilkreises 14 (Drehrate $\dot{\alpha}$, abweicht. Entsprechend seiner oben beschriebenen Physik liefert der Kreisel nach Durchlauf eines Winkelinkrementes $\Delta\Phi_L^*$ (der * deutet darauf hin, daß die Messung mit Fehlern behaftet ist) jeweils einen Puls P_L . Die Kette von Pulsen wird nach Fig. 2 von dem Zähler Z_L aufsummiert. Zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 folgt eine Signalauslesung durch den Rechner 17 mittels des Pulses P_c . Zum Zeitpunkt t_2 ist in dem Beispiel nach Fig. 3 links, mittleres Diagramm, der Zählerstand $z_{L2} = 3$. Das nächste untere Diagramm zeigt den Zählerstand z_L für die Feinauslesung. Da der Rechner nicht synchron zu den Pulsen P_L zugreift, erfolgt die Winkelauslesung anhand des aktuellen und letzten Zählerstandes $z_{L2}(t_2)$ und $z_{L1}(t_2)$ zum aktuellen Auslesezeitpunkt t_2 sowie $z_{L2}(t_1)$ und $z_{L1}(t_1)$ zum letzten Auslesezeitpunkt t_1 . Da der Stand des Zählers $Z_T \sim 1/\gamma$, muß zur Wichtung dieser Zahlen als Bruchteil eines Winkelinkrementes $\Delta\Phi_L$ der Zählerstand für ein volles Winkelinkrement herangezogen werden, wozu der Rechner die letzten Zählerstände $z_{L1}(t_{1,2})$ verwendet.

Die zwischen t_1 und t_2 aufgelaufenen Winkelinkremente des Kreisels 8 und des Teilkreises 14, die im Rechner über einen längeren Zeitraum zu einem Gesamtwinkel integriert werden, sind somit:

$$(7) \quad \Delta\gamma_{12}^* = \Delta\Phi_L^* \left[z_{L2} + \frac{z_{L2}(t_2)}{z_{L1}(t_2)} - \frac{z_{L2}(t_1)}{z_{L1}(t_1)} \right]$$

$$(8) \quad \Delta\alpha_{12}^* = \Delta\Phi_T^* \left[z_{T2} + \frac{z_{T2}(t_2)}{z_{T1}(t_2)} - \frac{z_{T2}(t_1)}{z_{T1}(t_1)} \right]$$

Mit Bezug auf den letzten Zählerstand $z_{L1}(t_2)$ zur Wichtung von $z_{L2}(t_2)$ geht bei ungleichförmiger Drehbewegung ein geringfügiger Verlust an Meßgenauigkeit einher, der nun abgeschätzt werden soll.

Als Beispiel kann das in der Zeitschrift: DLR-Nachrichten, 61, November 1990, Seiten 12–15, beschriebene Experimental-Laserkreiselssystem (ELSy) dienen: Der Teilungswinkel $\Delta\Phi_L$ beträgt hier 1,13". Bei einem inkrementalen Teilkreis ist mit einem typischen Teilungswinkel von z. B. $\Delta\Phi_T = 36''$ zu rechnen. Die Grunddrehrate von Kreisel und Teilkreis beträgt $\alpha = 60^\circ/\text{s}$. Damit ergibt sich eine Pulsfrequenz für Kreisel und Teilkreis von:

$$(9) \quad f_L = \dot{\alpha}/\Delta\Phi_L = 191,2 \text{ kHz}$$

$$(10) \quad f_T = \dot{\alpha}/\Delta\Phi_T = 6 \text{ kHz.}$$

Eine Schwingung des Gehäuses mit $\beta = 0,1^\circ$ Amplitude und $f = 10 \text{ Hz}$ Frequenz wird sich in erster Linie in der Messung des Winkels α durch den Winkelencoder niederschlagen ($\hat{\alpha} \approx \beta$). Der maximale Winkelmeßfehler infolge Drehbeschleunigung $\ddot{\alpha}$ beträgt

$$\delta\alpha = -\frac{1}{4} \ddot{\alpha} \frac{\Delta\Phi_T^2}{\dot{\alpha}^2}$$

d. h., mit

$$|\alpha| = |\beta| = |\hat{\beta} \cos 2\pi f t|$$

$$(11) \quad |\delta\alpha| \leq \frac{\Delta\Phi_T^2}{\dot{\alpha}^2} \frac{\hat{\beta}(2\pi f)^2}{4} \approx 0,01''$$

was in der Praxis vernachlässigbar ist, insbesondere unter dem Gesichtspunkt, daß dieser Fehler bei periodischen Drehbeschleunigungen im Mittel verschwindet.

In Fig. 4 ist eine vereinfachte Ausführungsform der Schaltung 16 zur Signalverarbeitung durch vom Teilkreis gesteuerten Zeittakt wiedergegeben.

Hier entfällt der Aufwand zur Interpolation der Teilkreis-Winkelinkremente $\Delta\Phi_T$, was dadurch erkaufte wird, daß nun bei ungleichförmiger Bewegung die Signalauslesung und -verarbeitung abhängig wird von Drehgeschwindigkeitsschwankungen des Gehäuses. Diese Ausführungsform ist dafür vorteilhaft bei der unten beschriebenen Kalibrierung der Teilkreis-Intervalle. Die Signalverarbeitung der Kreismessung ist mit der oben unter Bezug auf die Fig. 2 und 3 beschriebenen identisch, d. h., Gl. (7) bleibt gültig. In Gl. (8) fallen dagegen die zwei rechten, nicht ganzzahligen, Terme weg.

In Gl. (7) und (8) ist davon ausgegangen worden, daß die Messungen mit Fehlern behaftet sind.

Allgemein ist für den Kreisel eine relative Skalenfaktor-Abweichung κ_L und eine Drift D anzusetzen, so daß nach Gl. (7) der gemessene Winkel $\Delta\gamma^*$ vom wahren Winkel $\Delta\gamma$ nach folgender Beziehung abweicht:

$$(12) \quad \Delta\gamma^* = (1 + \kappa_L) \Delta\gamma + \int_{t_1}^{t_2} D \, dt$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Komponente der Erddrehrate kompensiert ist, wie es bei räumlichen Winkelmessungen Voraussetzung ist. Bei Messungen in einer Ebene ist sie konstant und kann als Beitrag zur Kreisel drift aufgefaßt werden.

Für eine hochgenaue Winkelmessung müssen κ_L und D bestimmt werden, was bei dem Erfindungsgegenstand nach bekannten Verfahren (Winkelmessungen mit dem Laserkreisel GG 1342, DLR-Forschungsbericht, 89—50, 1989) im geostationären Zustand durch Bezug auf den Vollkreis ohne zusätzlichen gerätetechnischen Aufwand geschehen kann.

Auch für die Teilkreismessung nach Gl. (8) muß eine relative Skalenfaktor-Abweichung $\kappa_T(\alpha)$ angesetzt werden:

$$\Delta\alpha^* = [1 + \kappa_T(\alpha)] \Delta\alpha, \quad (13)$$

wobei $\kappa_T(\alpha)$ dem relativen Summenteilungsfehler entspricht.

Auch sie kann durch eine einmalige Kalibrierung ermittelt werden, durch Vergleich mit einem Winkelnormal oder durch direkten Vergleich mit dem kalibrierten Kreisel im stationären Zustand. Zur Speicherung von $\kappa_T(\alpha)$ im Rechner für eine Kompensation in der Meßphase ist die Kenntnis des absoluten Winkels α Voraussetzung. Dies bedingt, daß der Teilkreis 14 mit einer Nullmarke versehen ist.

Damit wird die Winkelmessung nur noch von den Instabilitäten dieser Parameter fehlerhaft beeinflusst.

Mit den kalibrierten Werten für κ_L , D und $\kappa_T(\alpha)$ können die Gleichungen 7, 8 und 6 kontinuierlich ausgewertet werden als Basis für eine Präzisions-Winkelmessung und Navigation auf bewegtem Untergrund.

Obwohl die Kombination aus Kreisel und Teilkreis in dem hier dargestellten System mit jedem Kreiseltyp realisiert werden kann, bietet diese Anordnung speziell für den Laserkreisel weitere erhebliche Vorteile: Durch die bei diesem Winkelsystem notwendige kontinuierliche Drehbewegung von Kreisel und Teilkreis, wird der für den Laserkreisel typische Totbereich ("Lock-in-Effekt") automatisch vermieden. Durch die kontinuierliche Drehbewegung entfällt auch ein großer Teil des Sensorrauschens, das bei konventioneller Drehschwingbewegung ("Dither") auftritt. Darüber hinaus kann die Winkelauflösung, die beim konventionellen Laserkreisel etwa 2'' beträgt, durch dieses Konzept ganz erheblich verbessert werden; 0,01'' sollten nach dem gegenwärtigen Stand der Technik erreichbar sein.

Für regelungstechnische Anwendungen ist auch die maximal erreichbare Auslesefrequenz bzw. die Frequenzbandbreite des Sensorsystems von Interesse. Auch hierfür bietet das beschriebene Kreiselmeßsystem große Vorteile, wie das obige Beispiel zeigt.

Das hier vorgestellte Winkelmeßsystem läßt sich relativ einfach zu einem System zur Messung räumlicher Winkel erweitern.

Die räumliche Winkelmessung setzt den Einsatz von drei Kreiseln voraus, d. h. bei direkter Verwendung des oben beschriebenen Konzeptes drei Kreisel, drei Teilkreise, drei Schleifringsätze zur Energie- und Signalübertragung und drei Antriebseinheiten.

Eine äußerst vorteilhafte Anordnung zur räumlichen Winkelmessung ist in Fig. 5 gezeigt. Die Kreisel 30, 32,

34 sind auf den drei Seiten einer Pyramide 31 mit dreieckiger Grundfläche montiert. Diese Kreiseinheit wird um eine gemeinsame Achse 36 mit einer Drehrate α von einem Motor 37 gedreht. In dieser Weise erfahren alle drei Kreisel den gleichen Anteil von α . Diese Anordnung ist bekannt und ist besonders vorteilhaft für Laserkreisel einzusetzen (US-PS 40 17 187), da mit der Drehrate α die drei Kreisel mit Rate Bias betrieben werden und kein "Lock-in-Effekt" auftritt. Zusätzlich ist lediglich ein Teilkreis 38 erforderlich, der hier zentrisch zur Pyramidenachse auf der Achse montiert ist. Die Art der Signalauslesung und -auswertung in Verbindung mit dem Meßsignal des Teilkreises erfolgt wie oben für die Anwendung mit einem Kreisel beschrieben. Dabei werden hier die Meßsignale aller drei Kreisel, d. h. ihre drei Pulsfolgen P_L für die Winkelinkremente auf die eine Pulsfolge P_T von Winkelinkrementen des Teilkreis-Auslesesystems 40 bezogen. Die resultierenden Pulsfolgen sind sowohl ein Maß für die Drehrate γ_k der drei Kreisel (Index k) gegenüber dem Inertialraum als auch — nach Aufsummierung der Pulse — ein Maß für die vom System ausgeführte räumliche Drehbewegung. Die vom Teilkreis 38 gemessene Winkelstellung α der Kreiseinheit (IMU, Index g) gegenüber dem gestellfesten Koordinatensystem (Index p) dient zur Berechnung der Drehrate ω_p der Meßeinheit gegenüber dem Inertialraum

$$(14) \quad \omega_p = C_{pg}(\alpha) \omega_g.$$

Der Sensor für räumliche Winkel hat selbstverständlich die gleichen vorteilhaften Eigenschaften wie die oben beschriebene Anordnung für ebene Winkel. Diese betreffen in erster Linie das geringe Rauschen, wenn Ringlaser als Drehsensoren verwendet werden, die hohe Winkelauflösung und die hohe Bandbreite der Messung.

Skalenfaktorfehler und Driften ergeben bei der hier vorgesehenen kontinuierlichen Drehung ein zeitliches Anwachsen des Winkelfeldes, dem sowohl Laserkreisel als auch andere Drehsensoren unterliegen, die Laserkreisel jedoch am niedrigsten. Bei Verwendung der in Fig. 5 gezeigten Anordnung können deterministische Fehleranteile in der gleichen Weise wie bei dem oben beschriebenen Kreiselssystem für ebene Winkelmessungen kalibriert werden.

Bei Winkelmessungen auf bewegtem Untergrund oder bei der Navigation über längere Zeiträume führen Abweichungen des Skalenfaktors und der Drift von den kalibrierten Werten zu Meßabweichungen. Fig. 6 zeigt eine Anordnung, die in bekannter Weise (US-PS 40 17 187) auch diese Abweichungen auf ein Minimum reduziert. Zu diesem Zweck ist der in Fig. 5 gezeigte Sensorblock 29 um eine zweite Achse 50 drehbar gelagert, die senkrecht zu der Achse 36 angeordnet ist, die in einer Basis 58 drehbar gelagert und von einem nicht dargestellten Motor angetrieben ist. Auch auf dieser Achse 50 ist eine Scheibe 52 mit einem Teilkreis 53 angeordnet, die mit einem Auslesesystem 54 zusammenwirkt. Der am Teilkreis 53 ausgelesene Winkel ϑ zwischen dem Gestell 56 (Index p) und der Basis 58 (Index b) dient zur Berechnung der Drehrate dieser Meßeinheit im basisfesten Koordinatensystem:

$$(15) \quad \omega_b = C_{bp}(\vartheta) \omega_p = C_{bp}(\vartheta) C_{pg}(\alpha) \omega_g.$$

Die Drehrate α um die erste Achse 36 ist bei einem System mit Ringlaserkreisel so hoch zu setzen, daß sie die drei Kreisel aus dem Totbereich (Lock-in-Bereich) bringt; die Drehrate ϑ um die zweite Achse 50, die zur Ausmittelung der Winkelmeßfehler infolge Skalenfaktorfehler und Driften der drei Kreisel dient (carouseling), kann sehr viel niedriger angesetzt werden. Die Analyse zeigt, daß sich quasi-konstante Sensorfehler, d. h. solche, die sich gegenüber der Drehperiode um die zweite Achse sehr viel langsamer ändern, ausmitteln — bis auf einen kleinen Restanteil proportional der Summe aus dem jeweiligen Produkt des Skalenfaktorfehlers der drei Kreisel mit der Drehrate ϑ um diese zweite Achse 50. Auch dieser Anteil kann zum Verschwinden gebracht werden, wenn nach ein oder zwei Perioden das Vorzeichen von ϑ geändert wird.

Zusammenfassend können die wesentlichen Vorteile des beschriebenen neuen Kreisel systems zur Präzisionswinkelmessung folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Selbstkalibrierung über 360°-Umlauf;
- hohe Kalibriergenauigkeit durch Mittelung über große Meßdatenanzahl;
- hohe Bandbreite;
- Steigerung der Winkelauflösung von Laserkreisel systemen ($\approx 0,01''$);
- Möglichkeiten zur Erweiterung auf ein System zur räumlichen Winkelmessung mit weitgehender Kompensation von Skalenfaktor- und Driftfehlern.

Patentansprüche

1. Kreisel system zur Winkelmessung und/oder Navigation mit einem in einem Gehäuse (2) um eine gehäusefesteste Achse drehbar gelagerten und mit konstanter Drehgeschwindigkeit angetriebenen Kreisel (8), dadurch gekennzeichnet, daß auf der Drehachse (6) des Kreisels (8) zusätzlich ein Teilkreis (14) zur Messung der Drehung (α) gegenüber dem Gehäuse (2) angeordnet ist, der mit einem mit dem Gehäuse fest verbundenen Ausleseelement (16) zusammenwirkt, daß die Auslesung des Kreisels in Form einer ersten Puls-kette (P_L) und die des Teilkreises in Form einer zweiten Puls-kette (P_T) erfolgt, daß eine höherfrequente Zeitbasis (24) und Mittel (19, 20) zum Zählen für die Pulse der ersten Puls-kette und der Pulse (P_T) der Zeitbasis vorgesehen sind, daß ein Rechner (17) und Mittel (21) zum Einlesen der Zählerinhalte in den

Rechner mit einer Einlesefolge gleich oder größer als die Pulsfolge (P_r) der zweiten Pulschette vorgesehen sind, wobei der Rechner für die Interpolation des Pulsversatzes zwischen den Pulsen (P_L , P_T) der beiden Pulsketten unter Verwendung der Pulse (P_r) der Zeitbasis programmiert ist.

2. Kreissystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in den Rechner (17) gleichzeitig mit der Einlesung der aktuellen Zählerinhalte die vorhergehenden Zählerinhalte eingelesen werden.

3. Kreissystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß für die Pulse (P_L) der ersten Pulschette und die Pulse (P_r) der Zeitbasis (24) jeweils ein Rücksetz-Zähler (19, 22) vorgesehen ist, daß dem Rücksetz-Zähler (22) für die Pulse der Zeitbasis ein Speicher (25) nachgeschaltet ist, daß die Einspeisung des Zählerinhaltes des Rücksetz-Zählers für die Pulse der Zeitbasis in den Speicher durch die Pulse (P_L) der ersten Pulschette gesteuert wird.

4. Kreissystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Einspeisung der Inhalte des Speichers (25) und des Rücksetz-Zählers (19) für die Pulse (P_L) der ersten Pulschette in den Rechner (17) durch Pulse der zweiten Pulschette (P_T) gesteuert wird.

5. Kreissystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß parallel zu den Rücksetz-Zählern (19, 20) Speicher für den jeweils einer Einspeisung in den Rechner vorangegangenen Zählerinhalt vorgesehen sind.

6. Kreissystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß für die Pulse (P_T) der zweiten Pulschette ein Rücksetz-Zähler (20) und für die Pulse (P_r) der Zeitbasis (24) ein weiterer Rücksetz-Zähler (23) vorgesehen ist, daß dem weiteren Rücksetz-Zähler (23) für die Pulse der Zeitbasis (24) ein Speicher (26) nachgeschaltet ist, daß die Einspeisung des Zählerinhaltes des zweiten Rücksetz-Zählers (23) für die Pulse der Zeitbasis in den Speicher durch die Pulse der zweiten Pulschette (P_T) gesteuert wird und daß die Einspeisung der Inhalte der beiden Speicher für Pulse der Zeitbasis und der Inhalte der beiden Rücksetz-Zähler für die Pulse der ersten und zweiten Pulschette gleichzeitig erfolgt.

7. Kreissystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Einlesung der Inhalte der Speicher (25, 26) für die Pulse der Zeitbasis (24) und der Inhalte der Rücksetz-Zähler (19, 20) der ersten und zweiten Pulschette in den Rechner vom Rechner zu gewillkürten Zeitpunkten erfolgt.

8. Kreissystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur räumlichen Winkelmessung drei Kreisel (30, 32, 34) mit räumlich ausgerichteten Meßachsen symmetrisch auf der Drehachse (36) angeordnet sind.

9. Kreissystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ausmittlung der Kreiselfehler das Kreissystem mit den drei Kreiseln und dem Teilkreis auf einer Plattform (56) angeordnet ist, die im Gehäuse (58) um eine zweite Drehachse (50) drehbar gelagert ist, die senkrecht zur Drehachse (36) des Kreissystems liegt und mit konstanter Drehgeschwindigkeit relativ zum Gehäuse angetrieben wird, und daß auf dieser zweiten Drehachse ein zweiter Teilkreis (52) mit einem gehäusefesten Auslesemoment (54) zusammenwirkt.

10. Kreissystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zur vollständigen Ausmittlung von Kreisel-Skalenfaktoränderungen die Drehrichtung um die zweite Drehachse (50) nach einer oder mehreren vollen Drehperioden umkehrbar ist.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

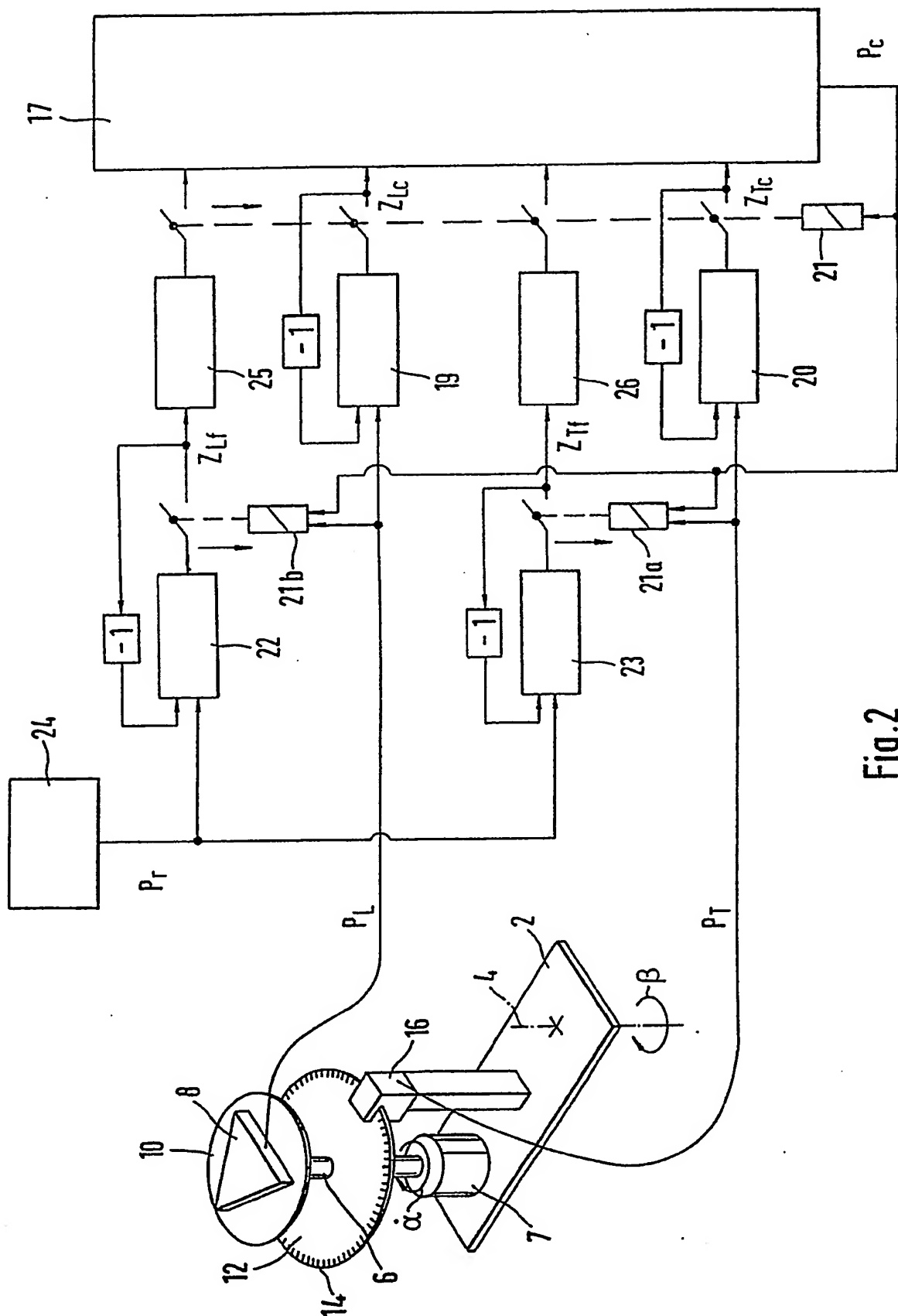


Fig. 2

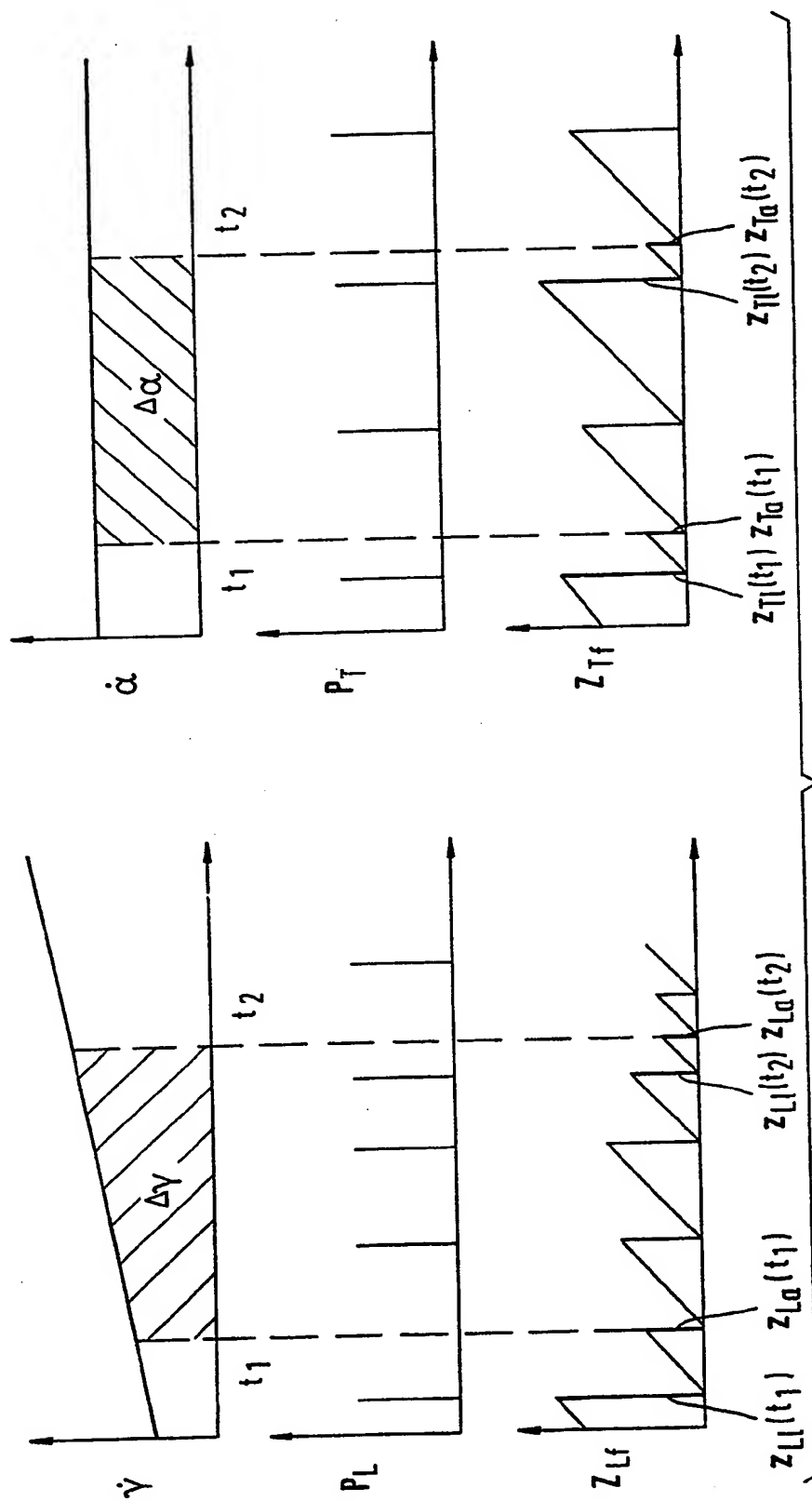


Fig. 3

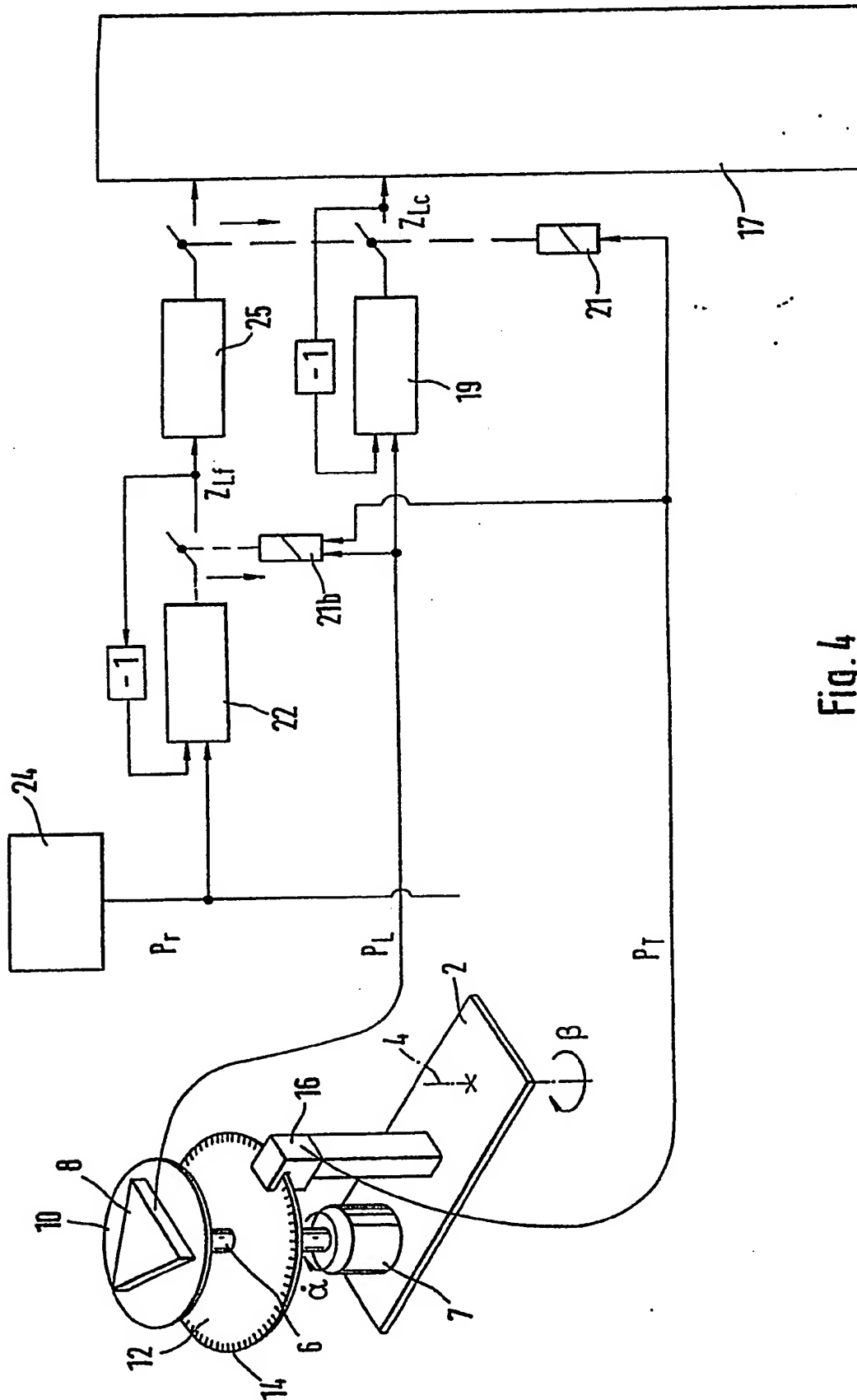


Fig. 4

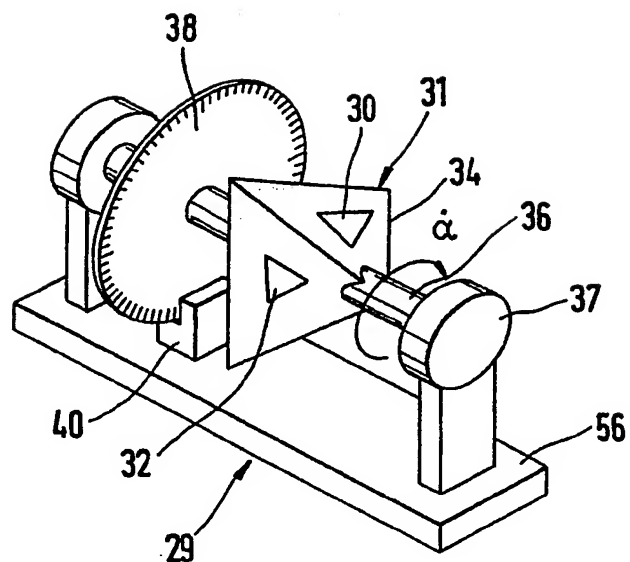


Fig. 5

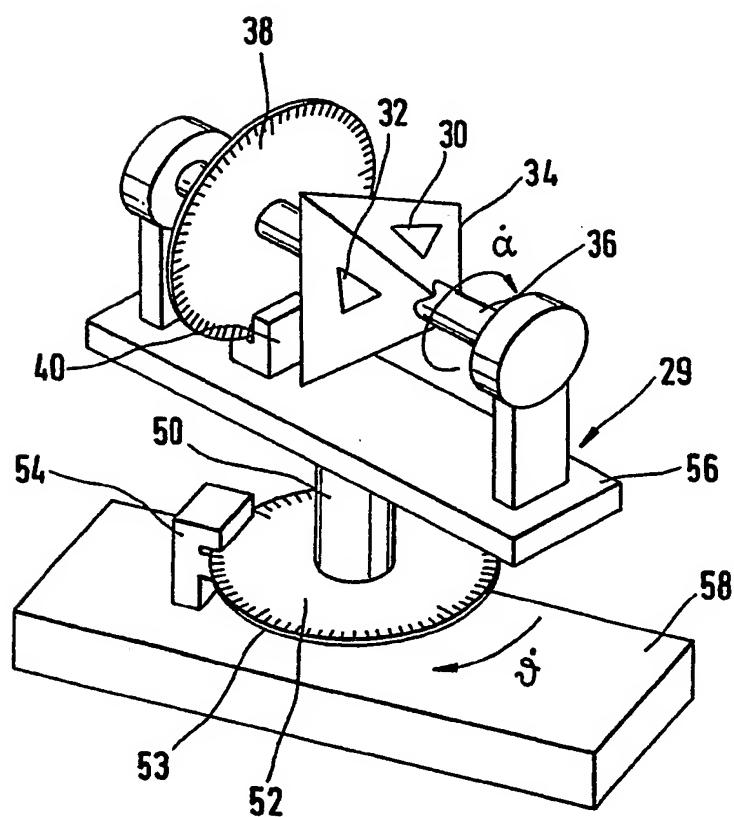


Fig. 6